

УДК 669.046.516:621.791.793

Е.Н. Еремин, д-р техн. наук, В.В. Шалай, д-р техн. наук,
Ю.О. Филиппов, В.К. Сумлининов, Омск, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКЕ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

Запропоновано для виготовлення кільцевих заготовок, що використовуються в авіаційному двигунобудуванні, застосовувати електрошлакове зварювання комбінованим електродом з модифікацією металу шва дисперсними частками карбонітрида титану. Наведено результати досліджень металу шва при зварюванні сплаву ХН77ТЮР. Показані переваги нової технології зварювання.

Предложено для изготовления кольцевых заготовок, используемых в авиационном двигателестроении, применять электрошлаковую сварку комбинированным электродом с модифицированием металла шва дисперсными частицами карбонитрида титана. Приведены результаты исследований металла шва при сварке сплава ХН77ТЮР. Показаны преимущества новой технологии сварки.

It is offered for manufacturing of the ring preparations used in aviation engine-building, to apply electroslag welding by the combined electrode with modifying of metal of a seam by disperse particles the carbonitrid titan. Results of researches of metal of a seam are given when welding alloy ХН77ТЮР. Advantages of new technology of welding are shown.

Изделия ответственного назначения, изготавливаемые из жаропрочных сплавов, широко применяются в авиационном двигателестроении. Производство заготовок таких изделий в сварном варианте позволяет существенно повысить коэффициент использования дорогостоящих сплавов (КИМ). Однако такие сплавы обладают низкой свариваемостью и поэтому заготовки изготавливаются большей частью различными методами горячего передела –ковки, прошивки, раскатки, что обуславливает высокую трудоемкость их получения и низкий КИМ. Применение таких технологических процессов является вынужденным решением, к которому прибегают из-за низкого качества сварных соединений. Поэтому изыскание технологии изготовления таких заготовок в сварном варианте является весьма актуальной задачей.

В этом отношении перспективно применение электрошлакового способа, обеспечивающего однопроходную сварку конструкций различной толщины. Однако широко зарекомендовавшие себя способы электрошлаковой сварки пластинчатым, проволочным и пластинчато-проволочным электродами не всегда обеспечивают необходимое качество сварных соединений из жаропрочных никелевых сплавов. В первую очередь, это связано с образованием в сварных соединениях специфических дефектов – непроваров, подрезов, усадочных раковин. Для их устранения значительно повышают размеры прибылей, что не решает задачи в целом и к тому же приводит к увеличению расхода электрод-

ного металла и существенному повышению затрат на последующее механическое снятие излишка металла шва из труднообрабатываемых сплавов.

С целью устранения отмеченных недостатков использовали электрошлаковую сварку комбинированным электродом, осуществляемую одновременным вводом в шлаковую ванну неплавящегося и плавящегося электродов (рисунок 1) с устройствами сигнализации оплавления корня шва и вывода усадочной раковины на специализированной установке, созданной на базе унифицированных узлов электрошлаковых аппаратов А-612 и А-433Р и источника питания ТШС-3000 [1, 2].

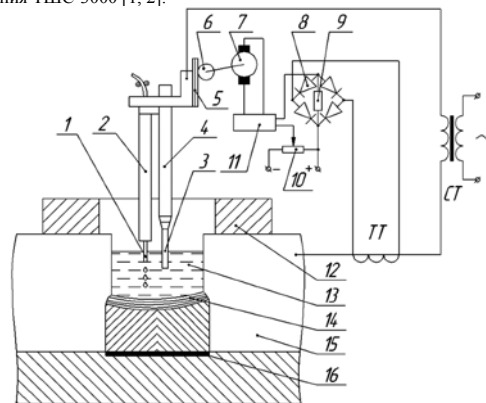


Рисунок 1 – Схема сварки комбинированным электродом: 1 – проволока; 2 –направляющий канал; 3 – неплавящийся электрод; 4 – мундштук; 5 – рейка; 6 – зубчатое колесо; 7 – электродвигатель; 8 – выпрямитель; 9 – сопротивление; 10 – потенциометр; 11 – усилитель; 12 – формирующая накладка; 13 – шлаковая ванна; 14 – металлическая ванна; 15 – свариваемые кромки; 16 –заправка

Отработка технологии электрошлаковой сварки комбинированным электродом проводилась на образцах из сплава ЭИ-437БУВД (ХН77ТЮР) толщиной 22-43 мм. В качестве неплавящегося электрода использовался вольфрамовый пруток диаметром 10 мм. Плавящимся электродом служила проволока ЭП-533 диаметром 3 мм.

Основной трудностью сварки жаропрочных никелевых сплавов являются низкие механические свойства металла шва и его жаропрочность. В связи с этим провели исследование качества сварных соединений с помощью металлографии, механических испытаний и испытаний на жаропрочность. Образцы

проходили термическую обработку в соответствии с ТУ на основной металл: закалка 1080 °С – 8 часов, охлаждение на воздухе, старение 700 °С – 16 часов, охлаждение на воздухе. Результаты испытаний показали, что свойства металла шва, полученного с применением проволоки ЭП-533, не удовлетворяют требованиям технических условий по всем показателям. Низка также и жаропрочность швов при температуре 750 °С и нагрузке 350 МПа, которая составляет 60-70 % от требуемой.

Как показано авторами ряда работ [3, 4] наиболее целесообразно использовать при сварке металлургические пути повышения свойств сварных соединений. К основному металлургическому приему следует отнести подавление столбчатого характера кристаллизации и измельчение кристаллической структуры путем легирования элементами – модификаторами [5, 6]. Кроме того, в случае образования равноосной структуры шва появляется возможность увеличения скорости сварки при неизменной погонной энергии [7].

В связи с этим для повышения свойств металла шва было применено модифицирование металлической ванны дисперсными инкуляторами [8]. Применили модификатор, в состав которого входят дисперсные частицы карбонитрида титана (0,04 %) [9]. Введение компонентов осуществляли переплавом дополнительного трубчатого электрода на никелевой основе, внутренняя полость которого заполнялась порошкообразным модификатором. Результаты испытаний образцов из сплава ХН77ТЮР представлены в таблице.

Таблица – Результаты испытаний сплава

Объект исследований	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{\text{т}}$, МПа	δ , %	KCU, МДж/м ²	τ_{350}^{750} , час
Немодифиц. шов	830–856 843	676–689 684	9,2–9,8 9,6	0,22–0,29 0,26	31–42 36
Модифицир. шов	982–1012 996	756–769 762	19,2–19,7 19,4	0,78–0,85 0,81	92–98 94
Требования ТУ	≥ 950	≥ 650	≥ 12	≥ 0,3	≥ 50

Металлографически исследовали место разрушения, величину зерна, распределение неметаллических включений и характер выделения упрочняющих фаз. Исследования макроструктуры показывают, что разрушение всех образцов носит межзеренный характер. Макроструктура немодифицированного шва характеризуется развитой транскристаллизацией от зоны сплавления к оси (рисунок 2, а). В средней части шва наблюдается область встречи двух кристаллизующихся фронтов. Столбчатые кристаллы имеют радиально-осевое направление с небольшим углом наклона. Рельеф поверхностей излома металла шва имеет блестящий камневидный вид без зон долома, что характеризует излом как хрупкий (рисунок 3, а).

117

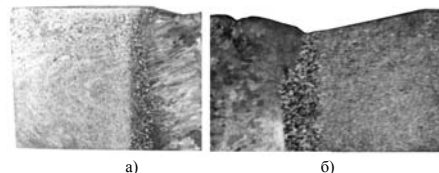


Рисунок 2 – Фрагменты макроструктуры сварных соединений, полученных ЭПС: а – без модифицирования; б – с модифицированием

При изучении мест разрушения образцов из немодифицированного металла шва после длительных жаропрочных испытаний, установлено, что оно всегда происходит в зоне направленной кристаллизации. Особенно низка жаропрочность металла шва, у которого границы кристаллитов расположены перпендикулярно, либо под небольшим углом к действию главных напряжений (рисунок 3, б).

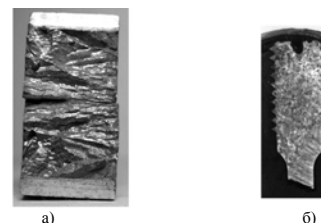


Рисунок 3. Характер разрушения образцов немодифицированного металла шва после испытаний на ударную вязкость (а) и жаропрочность (б)

Это можно объяснить тем, что важными факторами, определяющими качество и служебные свойства жаропрочных сплавов, являются фазовый состав, состояние границ зерен, их величина, степень однородности и морфология и топография включений [8, 10].

В макроструктуре модифицированного шва имеют место зерна, границы которых в основном приблизительно одинаково удалены от центра (рисунок 2, б). Размер зерна при этом уменьшается до 1,0–2,0 мм. Дефектов металла шва на всех шлифах не обнаружено. Модифицирование металла шва приводит к существенному изменению макрорельефа изломов ударных образцов, в которых появляются боковые зоны и зоны долома, а поверхность становится мелкозернистой и матовой (рисунок 4, а).

118

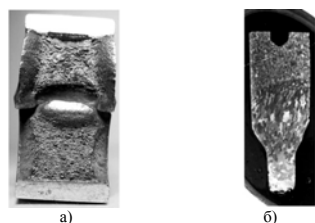


Рисунок 4 – Характер разрушения образцов модифицированного металла шва после испытаний на ударную вязкость (а) и жаропрочность (б)

Разрушение образцов во время длительных жаропрочных испытаний происходит в зоне равноосных относительно мелких зерен (рисунок 4, б). Образование такой структуры, устраняющей зону «слабины» по оси шва, приводит к повышению технологической прочности, что позволяет в свою очередь вдвое повысить скорость сварки.

Микроструктура немодифицированного металла шва характеризуется наличием большого количества строчных карбидов, иногда игольчатой формы, боридных эвтектических фаз на границах и значительным количеством мелких неметаллических включений вблизи границ (рисунок 5, а).

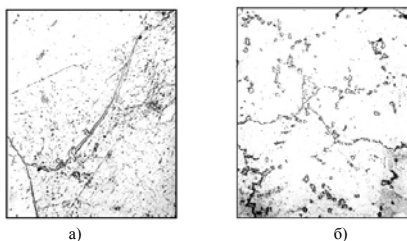


Рисунок 5 – Микроструктура металла шва: а – без модифицирования (×240); б – с модифицированием (×520)

Боридные эвтектики, имея относительно низкую температуру плавления, способствуют появлению кристаллизационных трещин при сварке.

Изучение микроструктуры металла модифицированного шва (рисунок 5, б) показывает, что карбиды в этом случае скоагулированы, они имеют компактную округлую форму, расположены большей частью на границах зерен, что по-видимому и упрочняет их, обуславливая повышенную жаропрочность такого металла. Количество неметаллических включений в этом случае незначительно. Структура околошовной зоны аналогична предыдущему слу-

119

чаю, но вследствие более высокой скорости сварки имеет меньший размер зерна, что несколько повышает свойства сварного соединения в целом.

Изучение γ' -фазы (рисунок 6) показывает, что образующиеся при распаде твердого раствора выделения упрочняющей фазы уже в литом состоянии являются достаточно мелкими и равномерно распределенными для модифицированного металла шва, кристаллизующегося при относительно высоких скоростях.

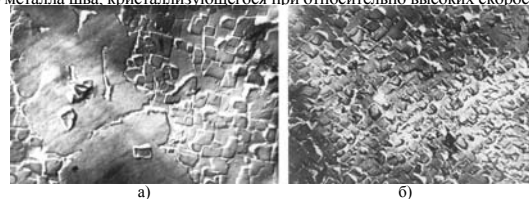


Рисунок 6 – Строение γ' -фазы в швах (×8000): а – без модифицирования; б – с модифицированием

В структуре немодифицированного шва наблюдаются обширные выделения вторичных фаз, занимающих значительную часть γ' -матрицы, вследствие чего количество γ' -фазы существенно меньше.

Применение разработанной технологии сварки позволяет существенно экономить материальные и денежные ресурсы за счет повышения качества и увеличения весовой точности кольцевых заготовок из жаропрочных сплавов в авиационном двигателестроении.

Список использованных источников: 1. Еремин Е.Н. Применение комбинированного электрода при электрошлаковой сварке материалов малых толщин // Автоматическая сварка. – 2005. – № 12. – С. 54–56. 2. Еремин Е.Н. Устройство для формирования шва при электрошлаковой сварке // Автоматическая сварка. – 2005. – № 9. – С. 50–51. 3. Хилишин Ф.Ф. Жаропрочные стали и сплавы. – М.: Металлургия, 1969. – 752 с. 4. Шоршоров М.Х. Горячие трещины при сварке жаропрочных сплавов. – М.: Машиностроение, 1973. – 224 с. 5. Землин В.Н. Жаропрочность сварных соединений. – Л.: Машиностроение, 1972. – 272 с. 6. Башиин Ю.А., Исакова В.Н., Масленкова Е.А. Влияние переплавных процессов на структуру и свойства сталей. – М.: Металлургия, 1991. – 240 с. 7. Дудко Д.А., Сидорук В.С., Тягунов Г.С. Пути снижения тепловложения в свариваемый металл при электрошлаковой сварке толстостенных конструкций // Автоматическая сварка. – 1982. – №10. – С. 48–50. 8. Сабуров В.П. Упрочняющее модифицирование стали и сплавов // Литейное производство. – 1998. – № 9. – С. 7–8. 9. Еремин Е.Н. Применение электрошлакового переплава для регенерации отходов жаропрочных сплавов // Современная электрометаллургия. – 2005. – №2. – С. 23–27. 10. Логунов А.В., Петрушин Н.В. и др. Прогнозирование влияния структурных факторов на механические свойства жаропрочных сплавов // Металл. – 1981. – № 6. – С. 16–20.

Поступила в редакцию 15.06.2012

120